

CONTROL ADAPTATIVO SOBRE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA CON GENERADOR DE INDUCCIÓN

NOMBRES

**Camilo Andrés Rivero Giraldo
Código 1088272529
Juan David Franco Díaz.
1088267171**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA
2017**

**CONTROL ADAPTATIVO SOBRE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA CON
GENERADOR DE INDUCCIÓN**

NOMBRES

**Camilo Andrés Rivero Giraldo
Juan David Franco Díaz.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Electricista**

**Director:
Ph.D Eduardo Giraldo**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA
2017.**

Índice general

Índice general.....	2-III
Resumen.....	2
1. Introducción	3
1.1. Definición del problema	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Metodología.	5
1.3.1. Trabajos previos en modelos de generación eólica.	5
2. Marco Teórico.	6
2.1. Modelo de la turbina de viento.	6
2.2. Modelo del viento.	11
2.3. Modelo matemático del generador de inducción.....	13
2.3.1. Control Adaptativo.....	17
3. Estimación de parámetros.	18
4. Resultados.....	26
4.1. Modelo de la turbina de viento.	26
4.1.1. Modelo del viento.....	27
4.1.2. Modelo del generador de inducción.	28
4.2. Esquema de control adaptativo.	28

5. Conclusiones.	33
6. Bibliografía.....	34

Resumen

En este trabajo se desarrolla en simulación un modelo de generación eólica usando un generador de inducción; donde el esquema de control se obtiene a partir de un control adaptativo, con el fin de aprovechar las variaciones en la velocidad del viento y de esta forma transmitir tales fluctuaciones en la máquina de inducción, el cual se modela a través de un control por campo orientado, que acopla las variables eléctricas y permite que su funcionamiento se controle desde un variador (inversor de tres a seis ramas) de velocidad.

En lugar de usar un generador de inducción doblemente alimentado convencional se usa una configuración back to back, donde el motor es representado por un modelo por campo orientado del flujo en el rotor, para permitir el desacople de las variables que determinan el torque a la salida del motor.

A este modelo por campo orientado se suma un control adaptativo, donde una variable que censa las variaciones de la entrada con respecto a la salida se ajusta para actualizar el control

1. Introducción

La creciente demanda de energía y la preocupación por el deterioro del medio ambiente, relacionado con la explotación de combustibles fósiles entre otros factores, vienen incrementando el interés mundial por fuentes alternativas de energía limpia y basadas en fuentes renovables. Entre estas, la generación eólica es una de las opciones que mayor impulso ha recibido, destacándose como una de las pocas que en la actualidad puede generar energía eléctrica “limpia” a costos casi competitivos con los métodos convencionales de generación. [2]

La capacidad eólica instalada ha venido creciendo a una tasa de alrededor del 25% anual durante la última década, llegando a 196 GW a finales del 2010 y constituyendo el 2,5% del consumo eléctrico mundial. En algunas regiones, tales como Dinamarca, Portugal, España y Alemania, el viento se ha convertido en una de las fuentes principales de abastecimiento de energía eléctrica (21%, 18%, 16% y 9% de consumo). Aún sin tener tanto auge a nivel mundial, el crecimiento va en aumento incluyendo más de 80 países, y por primera vez en el 2010, la capacidad eólica anual instalada en países de desarrollo y economías emergentes, tales como China e India, fue mucho mayor que en mercados tradicionales.[4]

En este documento se plantea un sistema de control adaptativo no lineal para la turbina de viento de velocidad variable, conectado a un generador de inducción, el cual se conecta a la turbina a través de un convertidor de voltaje back to back [5]. Esta configuración de velocidad variable permite extraer la mayor energía del viento en virtud de su característica aleatoria de velocidad. [1]-[6]

Los modelos matemáticos necesarios para el modelamiento del sistema de turbina-generador, junto con el sistema de acople de los mismos, son implementados en el software Matlab, igual que los sistemas de control basados en un control adaptativo [3], [2].

1.1. Definición del problema

En un sistema eléctrico de constante expansión, las investigaciones en el campo han desarrollado nuevas tecnologías para sistemas de conversión de energía eólica, se han convertido en un tema de alta prioridad en muchas regiones del mundo y se ha establecido conjuntamente con el aumento de tamaño de las turbinas, asociado al mejoramiento de los materiales, la electrónica de potencia y el diseño aerodinámico de las palas, e incorporando sistemas de control avanzado en modelos de conversión de energía eólica, donde éste, fue uno de los principales cambios tecnológicos responsables de la reducción del costo de la energía eólica. Este objetivo ha implementado la creación de eficientes estrategias de control para la conversión de la energía eólica como una actividad esencial, enfocada en optimizar el rendimiento y confiabilidad del sistema. [7].

Desde el punto de vista del control, esta tarea es especialmente desafiante, debido a numerosas características particulares de los sistemas de conversión de energía eólica, tales como: La naturaleza altamente no lineal de las turbinas eólicas, la variabilidad e intermitencia del viento y la habitual escasez de medidas online confiables del mismo, la incertidumbre en los modelos aerodinámicos y eléctricos del sistema, el efecto de sombra de la torre (presencia de modos de oscilación de baja frecuencia que pueden ser excitados por fluctuaciones del viento) y la existencia de comportamientos de no mínima fase [8]. También debe tenerse en cuenta que existen sistemas de conversión de energía eólica orientados a diferentes objetivos, dado a que la potencia eléctrica generada por una turbina eólica puede inyectarse directamente a la red o utilizarse en áreas aisladas, pequeñas comunidades o industrias, y que con frecuencia es combinada con otras fuentes de energía, conformando nuevos sistemas híbridos de generación.[9]

Las razones expuestas anteriormente, permiten afirmar que el desarrollo de nuevas estrategias de control para la conversión de energía eólica y tecnologías asociadas, no sólo van de la mano con áreas de investigación desde el punto de vista del control automático, sino también desde un campo científico y tecnológico, donde se interesan por problemas ambientales, sociales y económicos, y que buscan estrategias para combatir los déficit ya mencionados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar e implementar en simulación un controlador no lineal adaptativo sobre un sistema de generación eólica con generador de inducción.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar el generador de inducción, la turbina, el viento (especificar el modelo de representación: modelado por corrientes o por flujos).
- Diseñar un controlador no lineal usando linealización por realimentación adaptativa.
- Comparar los resultados contra controladores fijos.

1.3. Metodología.

Con el fin de cumplir con los objetivos mencionados, se utiliza la siguiente metodología dividida en seis etapas. La primera etapa permite la recolección bibliográfica. La segunda etapa está propuesta para el desarrollo del anteproyecto. En la tercera etapa se realiza la simulación. En la cuarta etapa se hace la redacción del documento final. La quinta etapa está dedicada para la revisión del documento, y por último en la sexta etapa se hace la entrega final del proyecto.

En la etapa de simulación, se modela la turbina de viento y el generador de inducción por control de campo orientado usando el software Simulink de Matlab.

Posteriormente se implementa en esta misma simulación el esquema de control adaptativo, luego de linealizar el modelo de turbina-generador; y con base en este modelo de simulink se obtienen las respuestas para diferentes estados operativos de la turbina de viento

1.3.1. Trabajos previos en modelos de generación eólica.

Hasta finales de 1950, gran parte del diseño de controladores estaba basado en Bode, Nyquist, gráficos Ziegler-Nichols o análisis de respuesta al impulso, estas técnicas estaban limitadas a diseñar controladores para sistemas con una sola entrada y una sola salida; estos sistemas se conocen como SISO (single input, single output) [14]. En 1960 Kalman introduce la representación en espacio de estados y además puso las bases para la teoría de espacio de estados basado en

filtrado óptimo y control óptimo mediante la implementación del filtro de Kalman [16]-[20].

El diseño de controladores se limitaba a los campos relacionados con aplicaciones mecánicas, eléctricas y aeroespaciales; sin embargo, Los aportes de Kalman representaron el desarrollo de modelos dinámicos mediante los cuales fue posible el desarrollo de controladores para campos relacionados con procesos de control, sistemas ambientales, sistemas biológicos, sistemas biomédicos, entre otros [14] [16]. Las investigaciones de Ho y Kalman acerca de la representación en espacio de estados habían encontrado la solución de problemas determinísticos; sin embargo, de En 1974 Akaike encontraría la solución de problemas estocásticos mediante la identificación de sub-espacios [14] [17]. Por otra parte °Astrom y Bohlin introdujeron a la comunidad de control el modelo ARMA y ARMAX, además del marco de máxima verosimilitud. Estos aportes darían paso al desarrollo de la predicción de error en la teoría de identificación [14] [15]. En 1978 los investigadores pasaron de buscar “el sistema verdadero” a la “mejor aproximación del sistema” [14]. Finalmente en 1986 Gevers and Ljung, con su libro “System identification: Theory for the user” darían lugar al reconocimiento de la teoría de identificación como un problema de diseño [14] [7]. Hoy en día el campo de la identificación de sistemas abarca áreas como el diseño experimental, la identificación de bucle cerrado, identificación en el dominio de la frecuencia, estimación de incertidumbre, y control robusto [14].

2. Marco Teórico.

2.1. Modelo de la turbina de viento.

La turbina eólica extrae la energía del viento y la convierte en energía mecánica. El modelo de una turbina eólica se desarrolla sobre la base de las características de potencia de estado estacionario de la turbina. El modelo que Simula la turbina eólica estudiada se muestra en la figura siguiente:

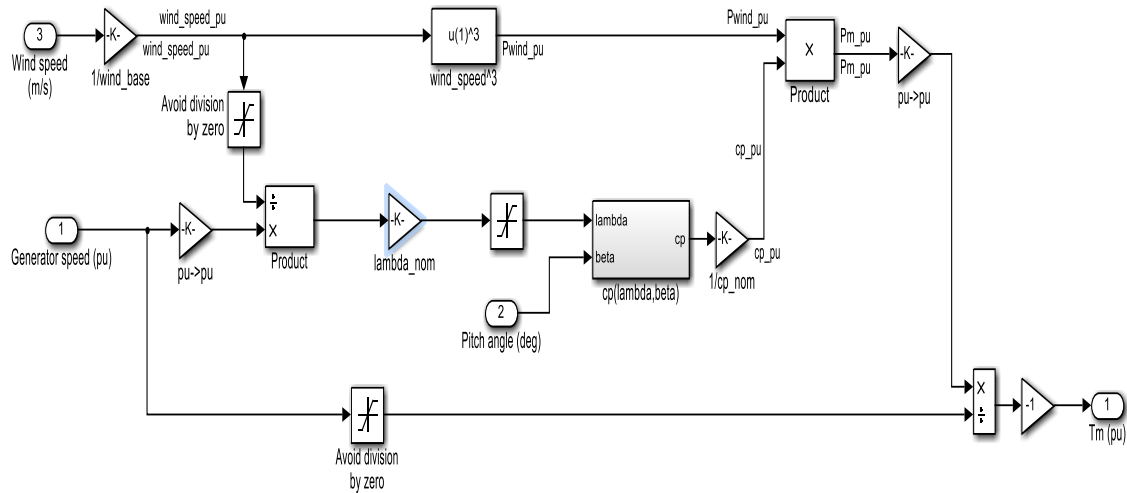


Figura 2-1. Modelo de la turbina de viento en Simulink/Matlab.

Una breve descripción de la ley de la conservación de la masa y de la ecuación de continuidad de mecánica de fluidos, se presenta a continuación. En una masa de flujo de aire constante de área circular A , que pasa a través del área del disco de una turbina, el flujo de la masa de aire es función de la densidad del aire ρ y de su velocidad V_a [6].

De la expresión de energía cinética del flujo de aire, la potencia contenida en el viento que pasa por un área A con velocidad del viento.

$$P_w = \frac{\rho}{2} A v_1^3 \quad (2-1)$$

Donde ρ es la masa específica del aire que depende de la presión del aire y de la humedad, se supone $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$. Las corrientes de aire tienen dirección axial a través de la turbina eólica, de lo que A es el área de barrida circular. La potencia útil obtenida se expresa por medio del coeficiente de potencia C_p . [6]:

$$P = C_p \frac{\rho}{2} A v_1^3 \quad (2-2)$$

Con aproximaciones numéricas se obtienen valores para C_p . [3]:

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\beta} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-12.5/\beta} \quad (2-3)$$

Siendo β como sigue:

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}} \quad (2-4)$$

Siendo λ la velocidad específica de la turbina de viento y θ su ángulo de paso.

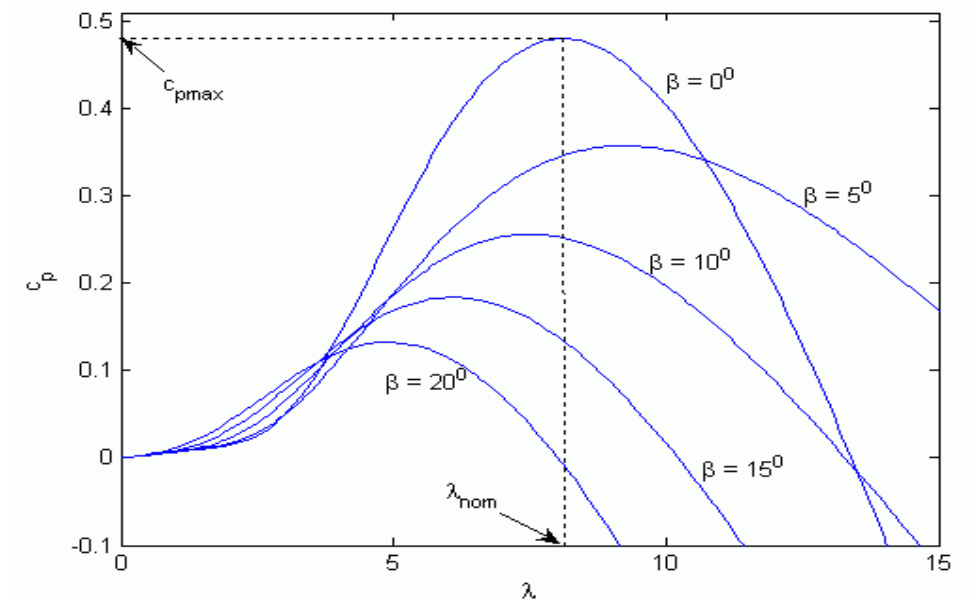


Figura 2-2.Característica C_p . Vs λ para diferentes valores de β [2].

A medida que el ángulo de paso θ aumenta, el coeficiente de potencia disminuye como se muestra en la Figura 1.3 y en consecuencia afecta la potencia que la turbina eólica extrae del viento, de acuerdo a la siguiente ecuación [10]:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\theta, \beta) v_1^3 \quad (2-5)$$

De tal forma que el torque entregado por la turbina de viento se obtiene a partir de la máxima energía extraída del viento P_t y la velocidad angular w_t :

$$P_t = T_t w_t \quad (2-6)$$

$$w_t = \frac{\lambda v_1}{R} \quad (2-7)$$

Combinando estas expresiones se obtiene la relación para el torque a la salida de la turbina:

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_1^2 C_t(\lambda, \beta) \quad (2-8)$$

Y C_t representa:

$$C_t = \frac{C_p(\theta, \beta)}{\lambda} \quad (2-9)$$

La energía generada a partir de la turbina depende del Coeficiente de Potencia. Para cada velocidad del viento, hay una velocidad de rotación de la turbina específica que genera la máxima potencia P_t . De esta manera, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para cada velocidad del viento aumenta la generación de energía en la turbina. La curva del Coeficiente de Potencia con la curva MPPT se muestra en la figura 1.4, de la que puede verse que, para cualquier velocidad del viento en particular, hay una velocidad de rotación ω_r , que genera la potencia máxima extraída, P_t , llamado también como el poder óptimo, P_{opt} .

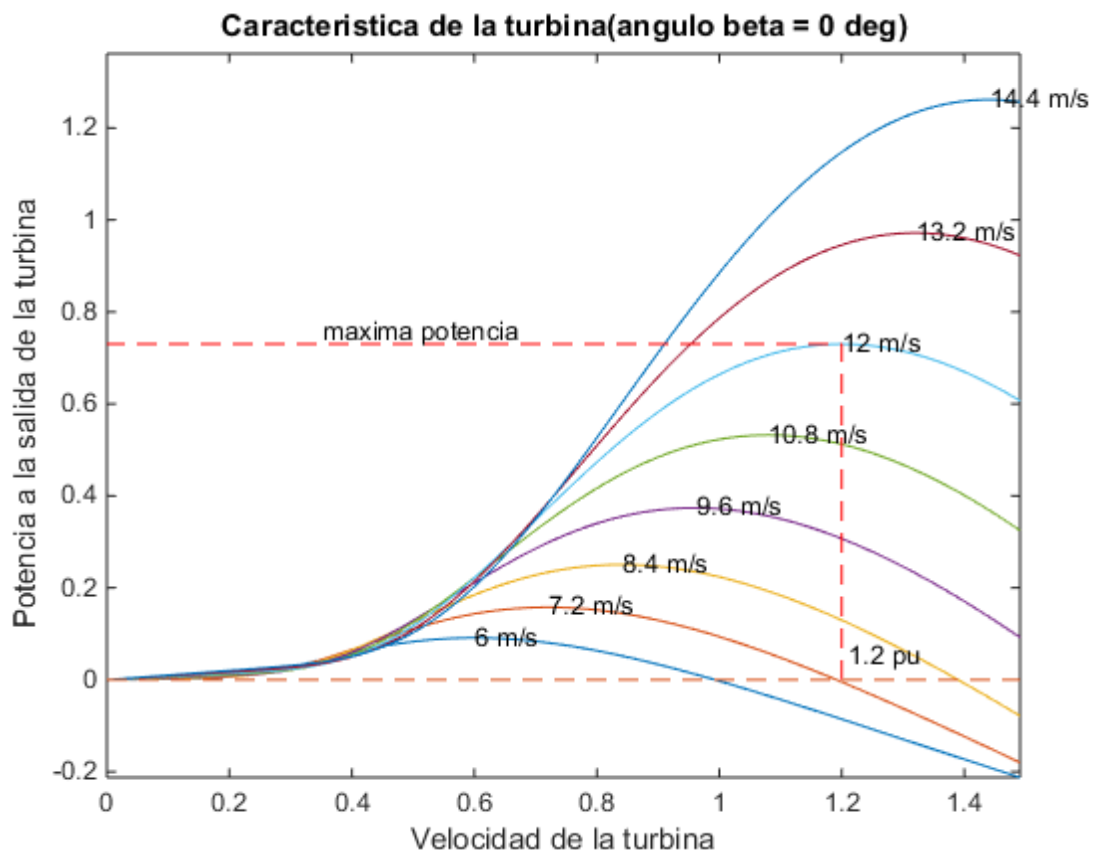


Figura 2-3. Máxima potencia entregada por la turbina de viento [4].

El tren de potencia o transmisión de los generadores eólicos consta de cinco partes, el rotor, el eje de baja velocidad, caja de cambios, eje de alta velocidad y el generador. En el análisis, las otras partes de las turbinas de viento, por ejemplo, la torre y los modos de flexión de las hélices pueden ser despreciados. Cuando el interés de estudio varía, la complejidad del tren de transmisión difiere. Por ejemplo, cuando se estudian los problemas tales como la fatiga de torsión, la dinámica de ambos lados de la caja de cambios tienen que ser considerados. Entonces, se requieren dos masas agrupadas o modelos más sofisticados. Pero cuando el

estudio se centra en la interacción entre los parques eólicos y las redes de CA del tren de transmisión puede ser tratada como un modelo de masa despreciable en aras de la eficiencia del tiempo y precisión adecuada. Por lo tanto, el tren de transmisión adopta la forma de un modelo de masa despreciable y se muestra en la figura 1.3 en el que los parámetros se han referenciado al del generador.

2.2. Modelo del viento.

La velocidad del viento, teniendo un marco de referencia inercial puede ser aproximado a través de la suma de dos componentes, la primera corresponde a un perfil de velocidad media que incide sobre el área del rotor y la segunda, denominada turbulencia, corresponde a las variaciones que presenta esta señal. La primera se asume constante en periodos de corta duración, mientras que la componente de turbulencia obedece a un comportamiento aleatorio, pudiéndose aproximar mediante leyes estocásticas [15].

El fenómeno de turbulencia se puede describir con base en algunos indicadores como la intensidad, que se define como la relación entre la desviación estándar y la velocidad media del viento, ecuación (2-10), y la densidad espectral de potencia (PSD)[15]. El espectro de Kaimal, ecuación (2-11), se ha convertido en una buena alternativa para representar este fenómeno, porque se aproxima a datos empíricos obtenidos de las observaciones atmosféricas [17].

$$\sigma = IV_0 \quad (2-10)$$

$$S_t(f) = \frac{\sigma^2 L}{2 V_0} \frac{1}{\left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{V_0} f\right)^{5/3}} \quad (2-11)$$

Dónde:

f Frecuencia

L Longitud de escala de la turbulencia

z Altura de la torre

σ Desviación estándar de la velocidad del viento

I Intensidad de turbulencia

V_0 Velocidad media del viento.

Para simular las variaciones del viento en el dominio del tiempo, en un punto sobre el área de barrido de las aspas, se emplea un generador de ruido blanco seguido de un filtro análogo, cuyo PSD se aproxima al de Kaimal [18]. El filtro se puede caracterizar por una función de transferencia de primero, segundo o tercer orden. En la ecuación (2.2) y (2.3) se presenta la función de transferencia para un sistema de segundo orden tomando valores de $\sigma = 0.1$, $L = 600$ y una velocidad media del viento de 15 m/seg en las ecuaciones anteriores como punto de partida para modelar dicha función de transferencia.

La estructura general del diagrama de bloques que simula el comportamiento del viento que incide sobre las aspas de una turbina eólica se observa en la figura 2-4 [8], donde θ corresponde al desplazamiento angular del eje de la turbina. En la figura se visualiza el PSD de una serie en el dominio del tiempo de 4000 s con un periodo de muestreo de 0.01 s, un radio del aspa de 40 m, una velocidad promedio de 20 m/s, longitud de escala de 600 m, una intensidad de turbulencia de 20% y una velocidad del rotor de 1,885 rad/s.

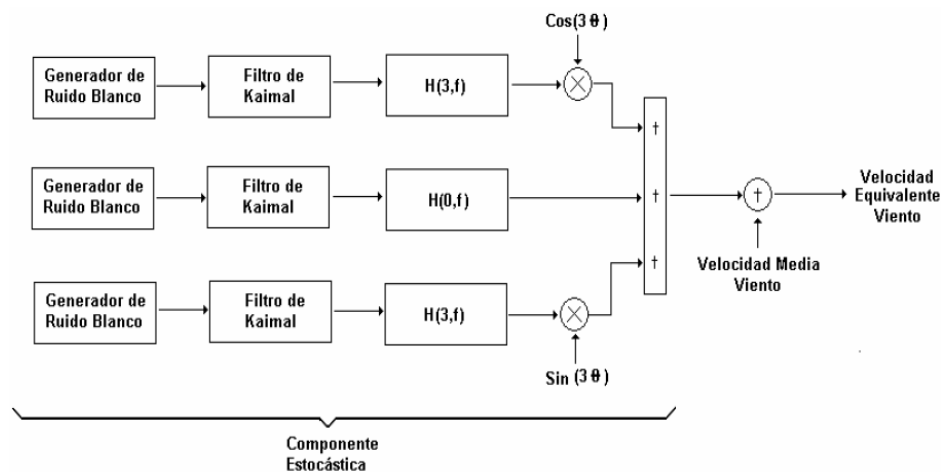


Figura 2-4. Diagrama del modelo de viento implementado en Matlab/Simulink [14].

De la figura 4, $H(3, f)$ y $H(0, f)$ se define de la siguiente manera:

$$H(3, f) = \frac{0.2766ds + 0.0307}{0.3691d^2s^2 + 1.7722ds + 1} \quad (2-12)$$

$$H(0, f) = \frac{4.7869ds + 0.9904}{7.6823d^2s^2 + 7.351ds + 1} \quad (2-13)$$

2.3. Modelo matemático del generador de inducción.

El desarrollo de un modelo matemático de la máquina de inducción en coordenadas primitivas es una tarea relativamente simple [10]. Sin embargo, el modelo resultante en estas coordenadas depende de la posición angular del rotor. Además, esta dependencia es no lineal. Las máquinas convencionales de inducción poseen un número importante de bobinas, normalmente tres en el estator y tres o más en el rotor. Por esta razón, el sistema de ecuaciones diferenciales que determina el comportamiento dinámico del convertidor, dependen de la posición angular del rotor, masiva y no-linealmente. Analizando el problema a la luz de los métodos modales [19], es posible identificar las transformaciones de coordenadas que reducen el problema a dimensiones manejables. Las componentes simétricas instantáneas cumplen un papel importante en este cometido [19]. Simplificando el problema, es posible adecuar las técnicas utilizadas para representar el comportamiento dinámico de la máquina sincrónica, a la modelación transitoria de la máquina de inducción. Es necesario considerar siempre la existencia de un grado de libertad adicional en este caso. Los modelos que se obtienen finalmente para el análisis dinámico y transitorio de la máquina de inducción son más simples, completos y precisos que el circuito equivalente clásico. A pesar de esto, existen aún ciertos problemas prácticos que es necesario resolver, y en esa dirección se realiza un esfuerzo importante de investigación en la actualidad.

Durante las dos últimas décadas se han venido introduciendo nuevos conceptos en el área de las máquinas eléctricas, tales como el de los vectores espaciales [53], los fasores espirales [7] o las coordenadas de campo orientado [5]. Aun cuando en este trabajo no se pretende discutir la eficacia de estos conceptos en la simplificación del modelo de la máquina de inducción, si se intenta presentar una visión general que identifica estas ideas relativamente nuevas, con los desarrollos clásicos de transformación de coordenadas, que se venían utilizando varias décadas atrás.

Reproducir cualquier fenómeno físico mediante un modelo es una tarea que solamente puede ser alcanzada con cierto grado de aproximación al comportamiento real. La dinámica de los sistemas físicos depende de infinidad de detalles y condiciones, algunos más importantes que otros. Una determinada consideración o hipótesis puede ser muy importante en algunas aplicaciones del modelo y completamente despreciable en otras circunstancias. Cuando se desarrolla un modelo concreto de la máquina de inducción es necesario imponer ciertas condiciones, hipótesis, aproximaciones y restricciones que definirán el ámbito de validez de la representación obtenida [3]. En los diferentes modelos de la máquina de inducción que se desarrollan en este capítulo, se supone que el convertidor electromecánico posee una pieza fija denominada estator, solidaria a un sistema de referencia inercial, y una pieza móvil, denominada rotor. El estator es prácticamente un cilindro hueco de material ferromagnético. El material se encuentra laminado en la dirección axial y posee ranuras en su parte interna, capaces de albergar los conductores correspondientes a las bobinas de la máquina. El rotor es aproximadamente un cilindro de material ferromagnético. Está laminado en forma semejante al estator, y las ranuras por donde pasan las bobinas o las barras de material conductivo son helicoidales, con la finalidad de eliminar los efectos que produciría una reluctancia variable. El diámetro del rotor es ligeramente inferior al diámetro interno del estator. La diferencia entre estos dos diámetros se denomina entrehierro de la máquina y es aproximadamente constante cuando se desprecia el efecto de las ranuras estatóricas y rotóricas.

En el rotor existe una pieza sólida, denominada eje mecánico. Se encuentra centrado con respecto al eje geométrico del cilindro rotórico. Esta pieza es el único puerto mecánico de la máquina de inducción, y a través de él se realizan todos los intercambios de par y velocidad con los sistemas externos. El eje mecánico está construido normalmente de acero y posee chavetas que transmiten el par cuando se acopla el eje con otras máquinas o accionamientos. El rotor está prácticamente ubicado en el centro del cilindro hueco del estator y tiene la libertad de girar con una fricción prácticamente despreciable. Esto se debe a la existencia de dos o más rodamientos mecánicos que centran el cilindro del rotor en el interior de la cavidad estatórica. En la carcasa se encuentra fijo el estator de la máquina, la caja de conexiones y los rodamientos que permiten el centrado y giro del rotor. El estator de la máquina posee varias bobinas repartidas en sus respectivas ranuras. Aun cuando pueden existir máquinas de inducción con una o dos bobinas, lo más

habitual es que en el estator de la máquina se distribuya un bobinado trifásico de múltiples pares de polos. En cualquier caso el espacio interior de la máquina y de sus ranuras, se distribuye por igual entre cada una de las fases y cada uno de los polos. Las bobinas pueden conectarse interna o externamente, en diferentes combinaciones serie-paralelo para ajustar la tensión de la máquina a las tensiones nominales normalizadas, en las conexiones delta y estrella. El rotor de la máquina de inducción puede ser de dos tipos, devanado o de jaula de ardilla. Si el rotor es devanado, la estructura y disposición de sus enrollados es semejante a los del estator. Las bobinas del rotor suelen ser diferentes a las del estator, porque el número y la forma de las ranuras del rotor no coinciden normalmente con la geometría y cantidad de las ranuras del estator. Es conveniente que los números de ranuras no coincidan para evitar vibraciones mecánicas por cambios periódicos de la reluctancia. Por esta razón, las ranuras del rotor se distribuyen helicoidalmente en la periferia del cilindro. Los rotores bobinados pueden o no tener cortocircuitados sus enrollados. Los rotores de jaula de ardilla, poseen barras de cobre o aluminio en lugar de bobinas. Las barras están cortocircuitadas por dos anillos conductores que las unen eléctricamente. Los rotores de jaula de ardilla pueden ser de barra profunda.

Las ecuaciones de la máquina de inducción en coordenadas primitivas representan su comportamiento mediante relaciones funcionales y no linealidades extremadamente complejas. Por esta razón es necesario estudiar el proceso de transformaciones de coordenadas que simplifica el problema. Estas simplificaciones permiten incrementar la comprensión del problema y acelerar la rapidez en la determinación de las soluciones. Estas dos ventajas hacen posible el empleo de los modelos transformados en una gran variedad de aplicaciones que requieren el uso de cálculo y estimación en tiempo real.

El modelo matemático que se utiliza para transformar los variables del motor del sistema de coordenadas abc al dq , es utilizado desde hace mucho tiempo como se muestra [11] El objetivo de estas transformaciones es pasar de las ecuaciones diferenciales no- lineales de las máquinas a un sistema de ecuaciones diferenciales lineales. Estas transformaciones sirven para reducir el tiempo de cálculo y especialmente para estudios de la máquina en algunas condiciones transitorias de su comportamiento. Además, éstas han sido introducidas para facilitar el análisis del motor.

Para modelar el motor de inducción se parte de las siguientes aproximaciones:

- a) Entrehierro uniforme.
- b) Circuito magnético lineal.

c) Devanados de los estatores idénticos y distribuidos físicamente de tal forma que se produce una sola fuerza magnetomotriz senoidalmente distribuida en el espacio de la máquina rotativa con las corrientes del estator equilibradas.

d) Se suponen las bobinas del rotor, o barras, organizadas de tal forma que su fuerza magnetomotriz está senoidalmente distribuida en el espacio y con el mismo número de polos que el estator.

Generalmente, los parámetros del motor se miden desde el devanado estatórico. Por tanto, es conveniente referir todos los parámetros del rotor al devanado del estator. Con las variables del rotor referidas al devanado del estator y con la inductancia propia separada en las componentes de la inductancia de dispersión, la inductancia de magnetización, se obtienen las ecuaciones de las tensiones de la máquina trifásica siguientes:

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - w \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (2-14)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} - w \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (2-15)$$

$$V_{dr} = r_r i_{dr} - (w - w_r) \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (2-16)$$

$$V_{qr} = r_r i_{qr} - (w - w_r) \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (2-17)$$

$$T_{em} = \frac{3P}{4} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2-18)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2-20)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (2-21)$$

$$L_{lr} = L_m^2 + L_r L_s \quad (2-22)$$

$$w_{sl} = w + w_r \quad (2-23)$$

2.3.1. Control Adaptativo.

Los organismos vivos como las plantas y los animales adaptan su comportamiento a los entornos en los que se encuentren incluso si son adversos, a esta característica se le llama adaptación. Cada adaptación implica una cierta pérdida para el organismo pero después de repetidas adaptaciones de los mismos, las plantas y los animales logran tener las pérdidas al mínimo. Junto a este tipo de sistemas que se encuentran en la naturaleza también existen sistemas técnicos capaces de adaptación. Estos varían en gran medida en la naturaleza, y un amplio rango de herramientas matemáticas se usa para describirlos. Es por eso que es imposible encontrar un único proceso matemático para definir todos los sistemas adaptativos [14]. Un sistema adaptativo tiene tres entradas y una salida, como se muestra en la figura 3.1. Teniendo en cuenta el medio ambiente que actúa sobre el sistema adaptativo, se tiene en cuenta dos componentes: la variable de referencia w y la perturbación v . La variable de referencia es creado por el usuario, pero, por regla general, la perturbación no puede ser medida. El sistema recibe información sobre el comportamiento requerido Ω , la salida del sistema es el comportamiento del sistema (Regla de Decisión) [14].

$$y = f(w, x, \theta) \quad (2-24)$$

Se produce una única salida y para cada cambio del comportamiento de w y v un cambio en el comportamiento se representa mediante el cambio del parámetro θ . Para combinación de (w, v, θ) se selecciona un lugar de θ , el parámetro θ^* con el fin de minimizar las pérdidas de la función y , en un periodo de tiempo determinado.

Básicamente se busca optimizar la función “ y ” para obtener el mínimo relativo de la misma, de tal forma que los parámetros siempre tengan el menor argumento de con respecto a las variaciones en la entrada del sistema.

3. Estimación de parámetros.

3.1. Algoritmo de mínimos cuadrados.

El método de mínimos cuadrados es aplicado a una gran variedad de problemas. Este es particularmente simple si el modelo matemático puede ser escrito en la siguiente forma, con el modelo del sistema en tiempo discreto:

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) \\ = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$y(k) = m(k)\theta \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} m(k) = [-y(k-1) \dots \\ -y(k-n) \quad u(k-1) \dots u(k-n)] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\theta = [a_1 \dots a_n \quad b_1 \dots b_n]^T \quad (3.4)$$

Y el vector de parámetros:

$$e(k, \theta) = y(k) - \hat{y}(k) = y(k) - m(k)\hat{\theta} \quad (3.5)$$

Partiendo de N pares $(y(k), m(k))$ se plantea:

$$E(N, \theta) = Y(N) - M(N)\theta \quad (3.6)$$

$$E(N, \theta) = [e(n, \theta) \dots e(N, \theta)]^T \quad (3.7)$$

$$Y(N) = [y(n) \dots y(N)]^T \quad (3.8)$$

$$M(N) = \begin{bmatrix} m(n) \\ \vdots \\ m(N) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Dado estas relaciones se busca la seudosolución (θ^*) del sistema óptimo en el sentido de los mínimos cuadrados, realizando la optimización para un mínimo de la función como sigue:

$$J(\theta) = \|E(N, \theta)\|^2 = \sum_{k=n}^N e^2(k, \theta) \quad (3.9)$$

El índice J se puede reescribir como:

$$J(\theta) = (Y(N) \dots M(N)\theta)^T (Y(N) - M(N)\theta) \quad (3.10)$$

El mínimo valor de θ que hace la derivada cero:

$$\frac{dJ(\theta)}{dt} = 0 \quad (3.11)$$

De otra forma se escribe la anterior relación como:

$$2(M(N)\theta - Y(N))^T M(N) = 0 \quad (3.12)$$

Se llega a la siguiente relación:

$$\theta^* = [M^T(N)M(N)]^{-1}M^T(N)Y(N) \quad (3.13)$$

Con base en la ecuación (3.13) tiene que existir la inversa de $M^T(N)M(N)$

3.2. Linealización del sistema turbina de viento - generador de inducción.

La finalidad de este procedimiento es obtener una relación lineal entre la entrada y la salida, usando realimentación de estados y transformaciones, de tal forma que se obtiene una nueva variable, cuya relación con la salida y es lineal como se muestra a continuación:

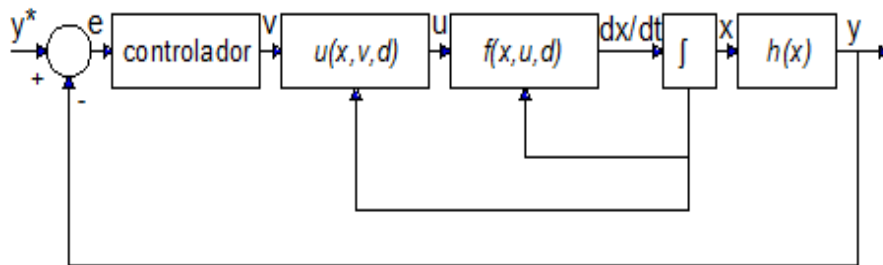


Figura 3.1. Esquema de realimentación linealizada [1].

Con base en el esquema de la turbina de viento, conectada al generador de inducción a través de un sistema de acople mecánico de relación mecánica n ; y modelando el generador por flujo de campo orientado se obtiene la siguiente relación para el torque a la salida del generador con su velocidad w_m .

$$J_r \dot{w}_m = T_t - T_{em} \quad (3.14)$$

Donde J_r representa la inercia combinada de la turbina de viento y del generador.

$$J_r = \left(\frac{1}{n}\right)^2 J_r + J_M \quad (3.15)$$

$$T_t = \frac{T_a}{n} \quad (3.16)$$

Se puede llegar a establecer la siguiente relación lineal:

$$T_{em} = J_r \left(\frac{\dot{T}_t}{J_r} - v \right) \quad (3.17)$$

Donde v se introduce como una entrada adicional y \dot{T}_t representa un estimativo del torque de la turbina de viento.

$$\dot{w}_m = \left(\frac{\dot{T}_t}{ca} + v \right) \quad (3.18)$$

Si adicionalmente se aproxima \dot{T}_t a cero mediante la estimación adaptativa de T_t se llega a la siguiente relación entre la velocidad de salida y la nueva entrada v :

$$\dot{w}_m = v \quad (3.19)$$

La velocidad deseada del motor se representa por la siguiente relación:

$$\dot{w}_m = n \frac{\lambda_{opt}}{R} V \quad (3.20)$$

$$e = \dot{w}_m - w_m. \quad (3.21)$$

Se busca que el control de lazo cerrado sea estable ante las variaciones en la entrada:

$$\dot{e} + ke = 0 \quad (3.22)$$

Se puede lograr alcanzar la estabilidad del sistema escogiendo la nueva entrada v como:

$$v = \dot{w}_m^* + ke \quad (3.23)$$

Donde k es un parámetro de diseño que se escoge como 1 para permitir que el error dinámico decaiga en un tiempo menor o igual a 5s.

3.2. Ley adaptativa.

El esquema básico del control adaptativo, [12] puede verse en la figura 3.2, está compuesto por un bucle principal de realimentación negativa, en el que actúa al igual que en los sistemas convencionales un regulador y de otro bucle en el que se mide un cierto índice de funcionamiento, el cual es comparado con el índice deseado y se procesa el error en un mecanismo de adaptación que ajusta los parámetros del regulador y en algunos casos actúa directamente sobre la señal de control. También puede existir un tercer bucle dedicado a supervisar la marcha de los dos bucles anteriores (Isermann 1982), en orden a asegurar la estabilidad del sistema y a mejorar la actuación del conjunto.

El mecanismo de adaptación presenta una solución en tiempo real al problema de diseño para sistema con parámetros conocidos, aunque como veremos más adelante, puede ir a un tiempo de muestreo superior al correspondiente al regulador e identificador.

La característica fundamental que distingue a los sistemas adaptativos es la presencia de un bucle de control en el que se compara un índice de funcionamiento (Landau 1981).

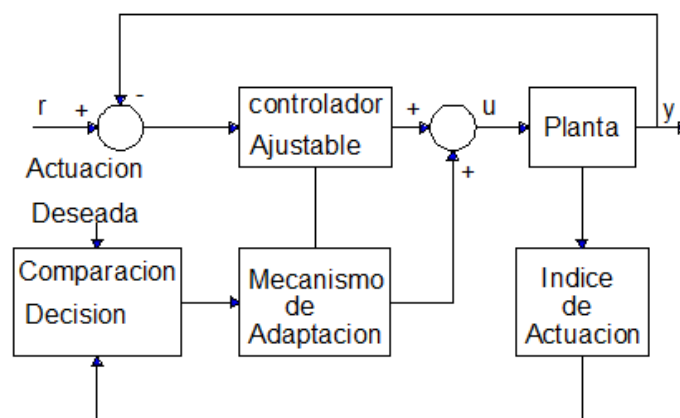


Figura 3.2. Esquema de control adaptativo.

Bajo dicho esquema la fórmula para el error dinámico se puede reescribir como sigue:

$$e = -ke - \frac{1}{J_R} \tilde{T} t . \quad (3.24)$$

Si \varnothing varía de acuerdo a la siguiente relación:

$$\varnothing(t) = -sgn(k) \gamma ev(t) \quad (3.25)$$

Con γ siendo una constante positiva ,luego para un tiempo $t=\infty$, $e = 0$; se llega a :

$$\tilde{T} t = \frac{\gamma e}{J_R} \quad (3.26)$$

Donde γ se escoge como 2×10^6 .

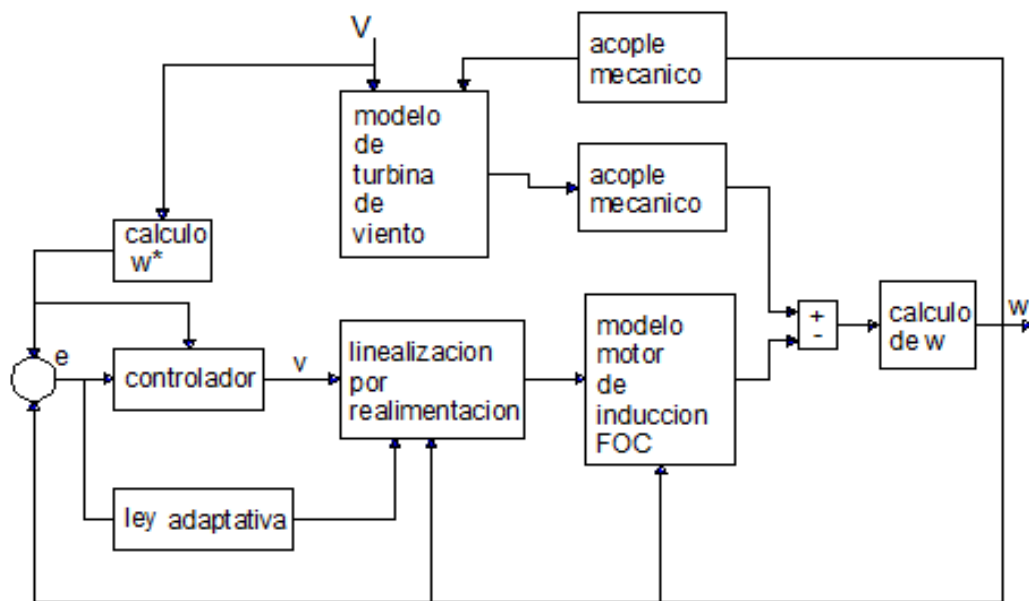


Figura 3.3. Esquema general para el control adaptativo [1].

4. Resultados

4.1. Modelo de la turbina de viento.

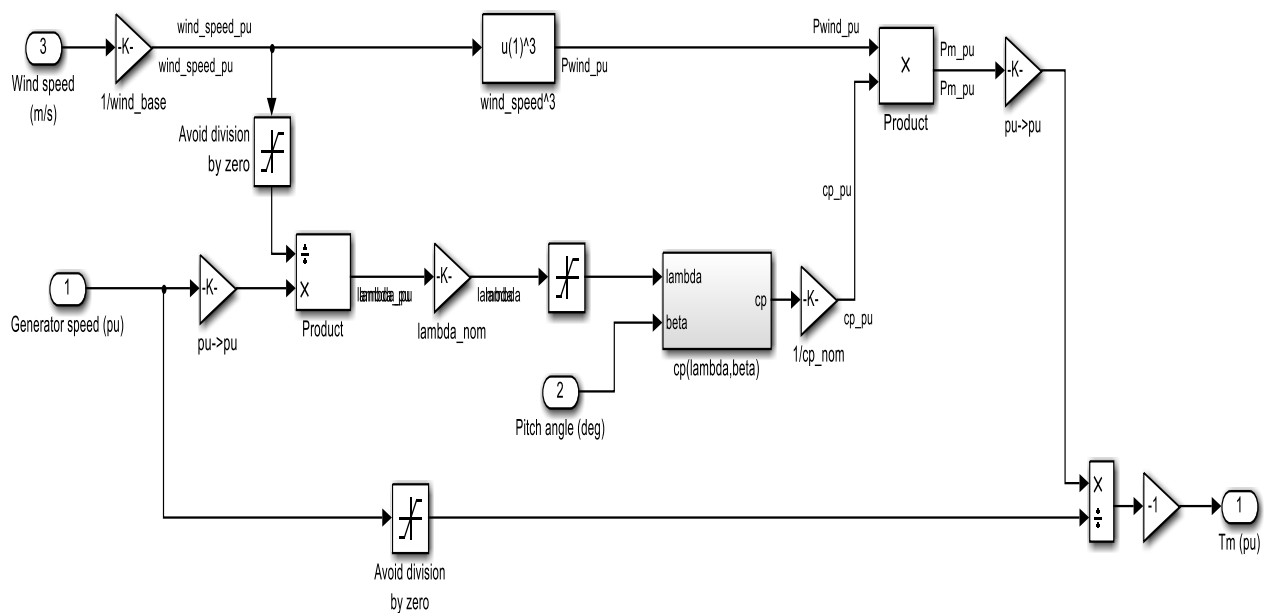


Figura 4-1. Diagrama de bloques de la turbina de viento.

La figura 4.1 muestra el diagramas de bloques q modela la turbina de viento; las entradas del sistema son la velocidad variable del viento y la velocidad angular del generador acoplado el eje de la turbina.

4.1.1. Modelo del viento.

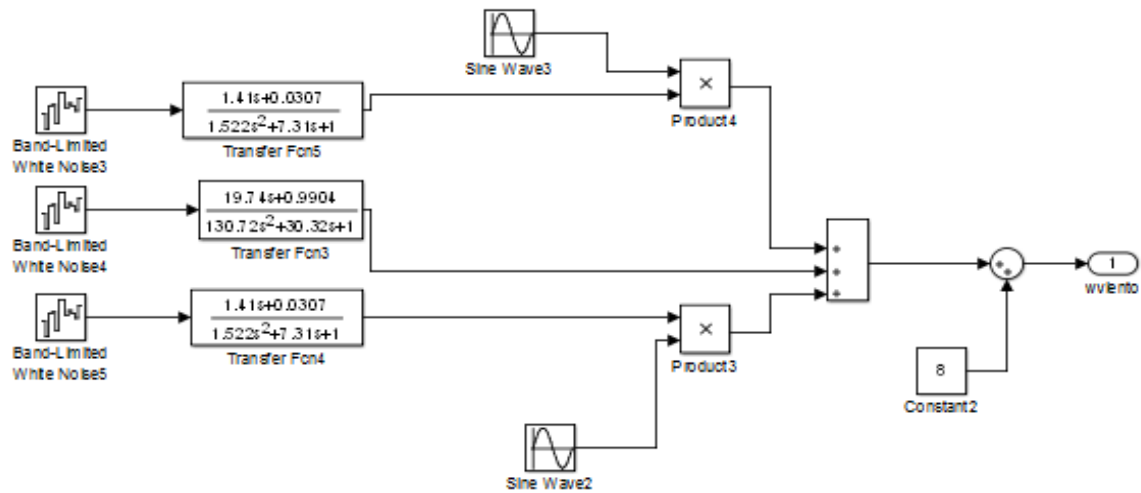


Figura 4-2. Esquema general del modelo del viento.

La figura 4-5 muestra modelo del viento basado en filtro Kalman, este es la entrada 1 para el modelo de la turbina de viento.

4.1.2. Modelo del generador de inducción.

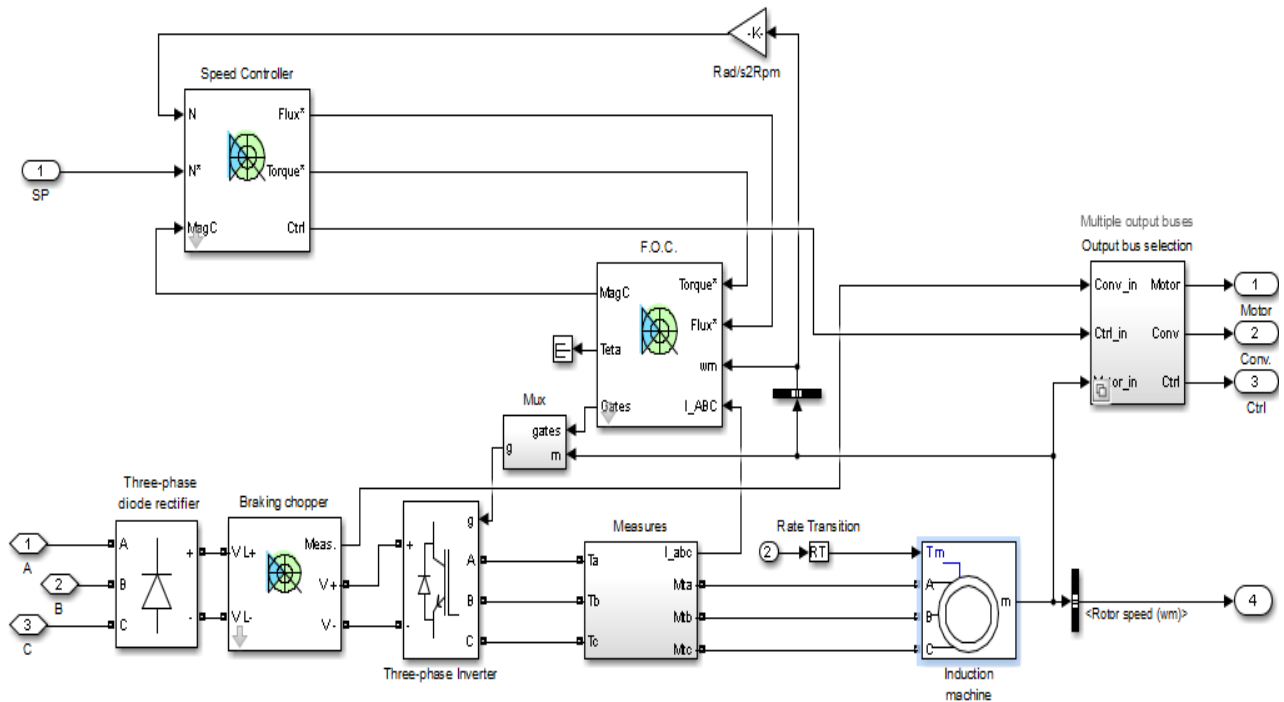


Figura 4-3. Diagrama de bloques de Simulink que modela el FOC.

La figura 4.3 ilustra el modelo del motor de inducción por campo orientado, donde se tienen en cuenta también controlador de velocidad y el esquema de fuente inversor fuente de voltaje, en el cual los dispositivos de estado sólido controlan su conmutación a partir del tren de pulsos que vienen determinados con un PWM derivado del error de las corrientes de referencia con respecto a los valores estimados referenciando el flujo magnético con el eje d giratorio.

4.2. Esquema de control adaptativo.

Se implementó en simulink el Esquema de control adaptativo mostrado en la figura 3.3, donde la ley adaptativa en la variable \tilde{T}_t , se modela conforme la ecuación (3.20), el objetivo es a partir de la variable v obtener una cuantificación de las

variaciones producidas en la entrada, que viene del bloque "modelo del viento" mostrado en la figura 4.2; de tal forma que el control pueda ajustar sus parámetros a dichas variaciones en la entrada

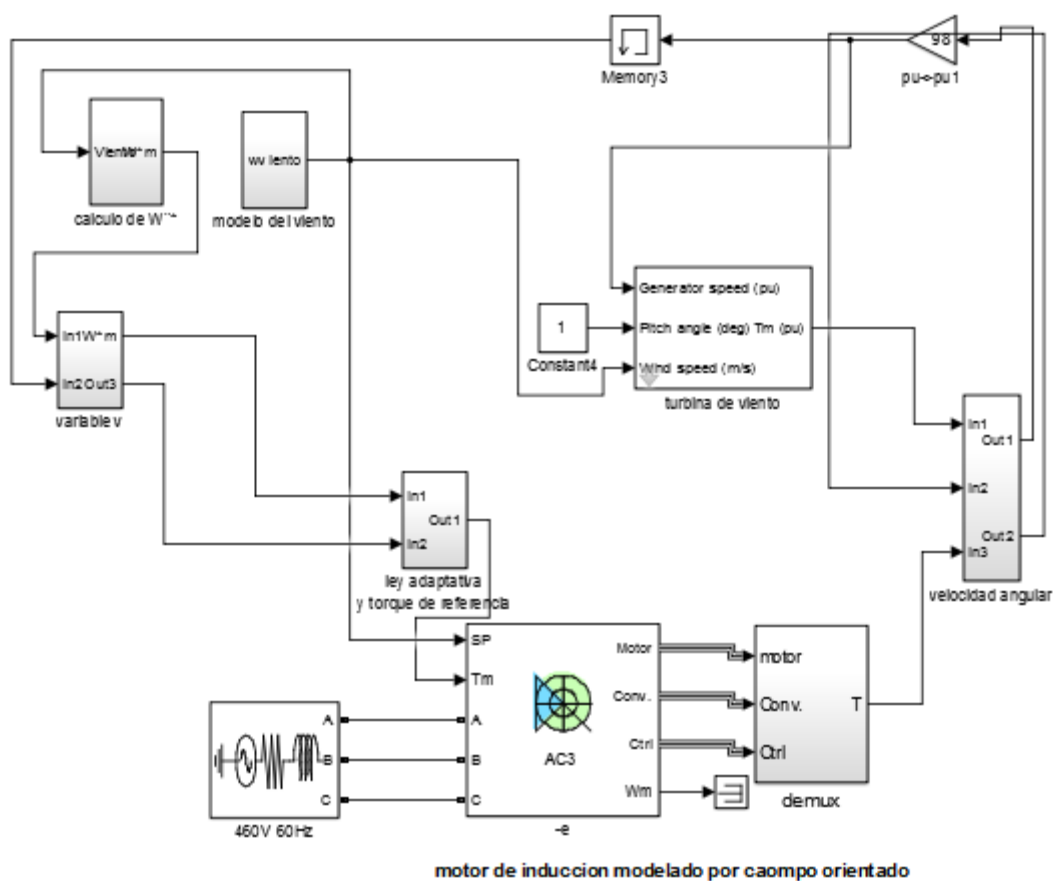


Figura 4-4. Modelo para el control adaptativo modelado en Simulink

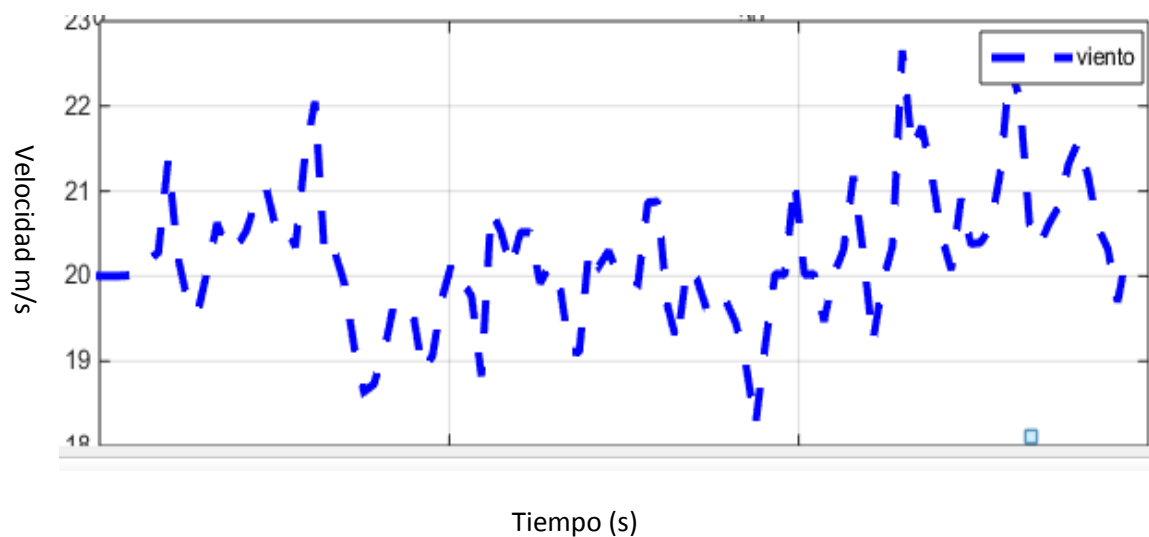


Figura 4-5. Velocidad del viento.

La figura 4-5 muestra el comportamiento del viento modelado por el diagrama de bloques mostrado en la figura 4-2.

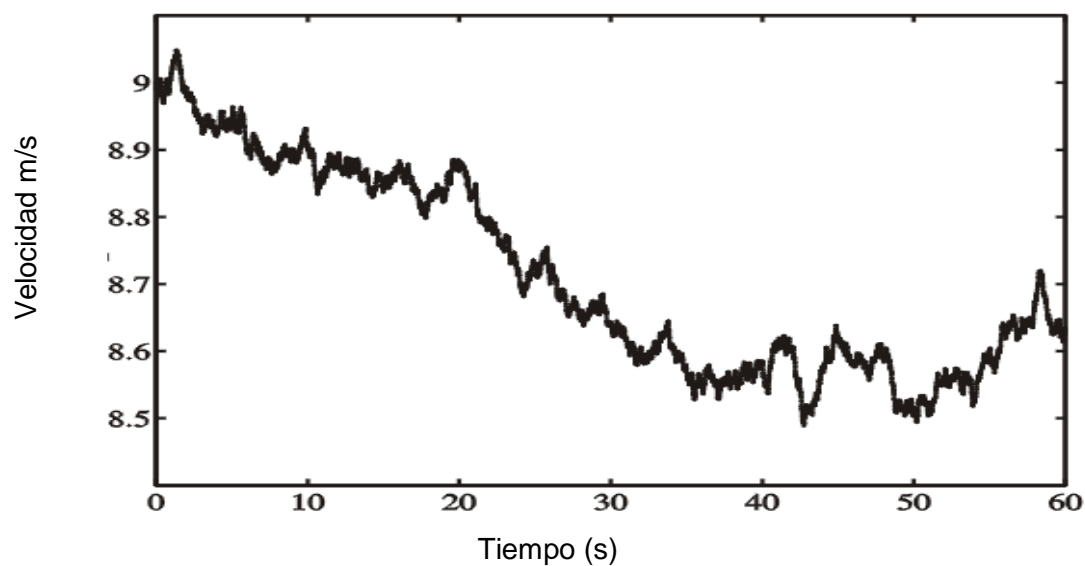


Figura 4-6. Perfil de velocidad de viento mostrado en [1].

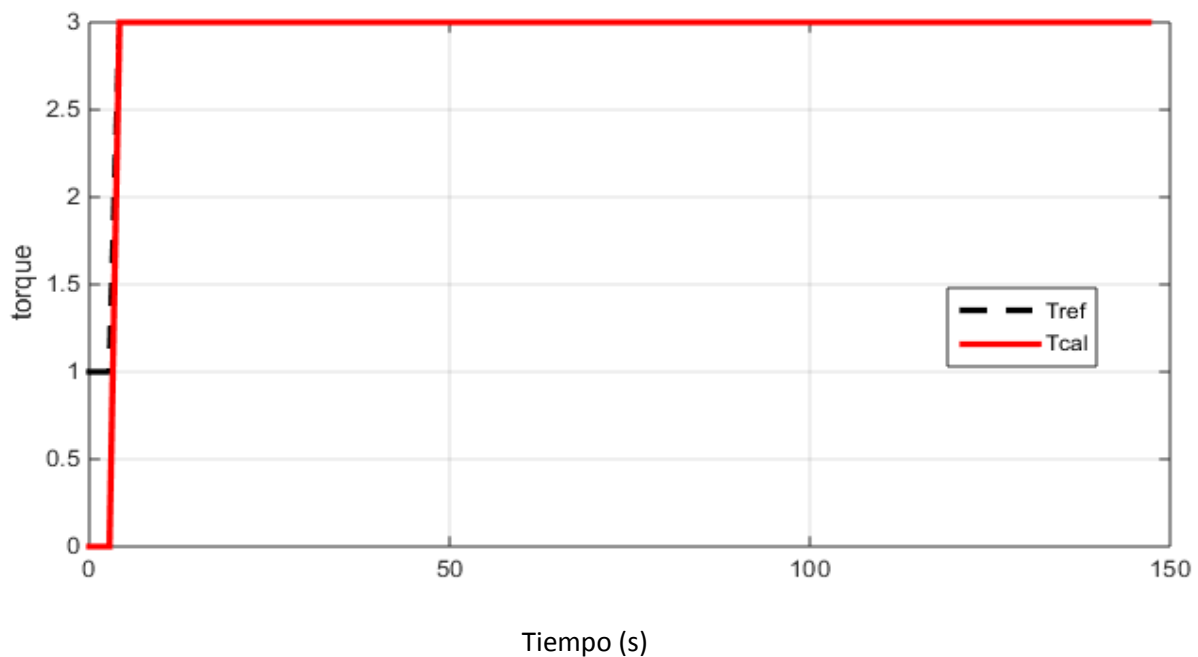


Figura 4-7. Respuesta para el torque obtenido con el esquema adaptativo.

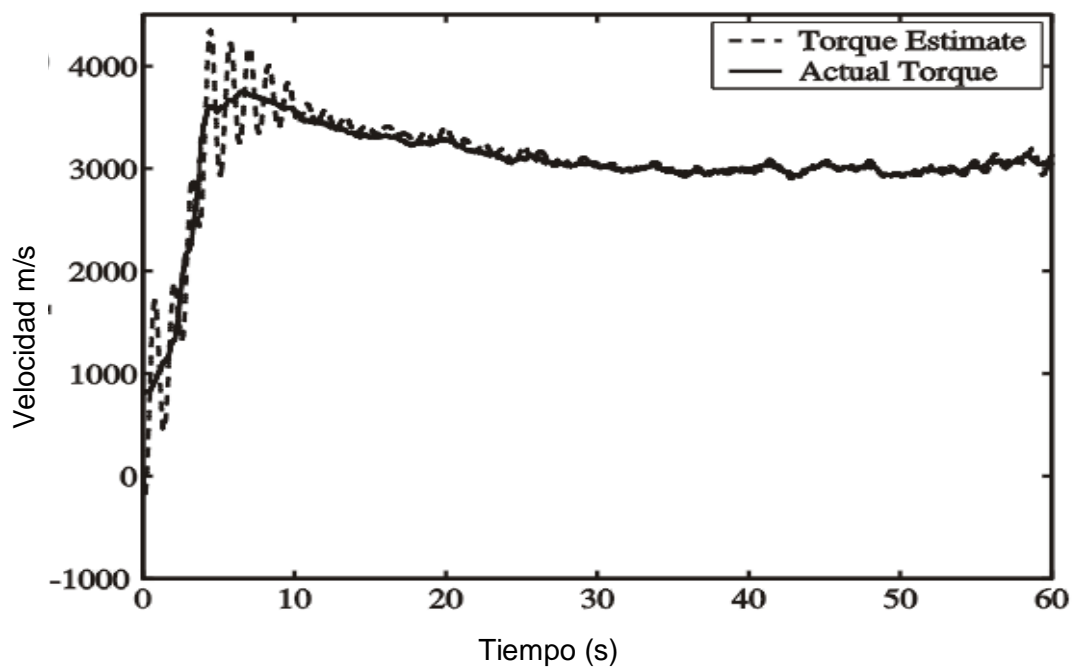


Figura 4-8. Torque estimado en [1].

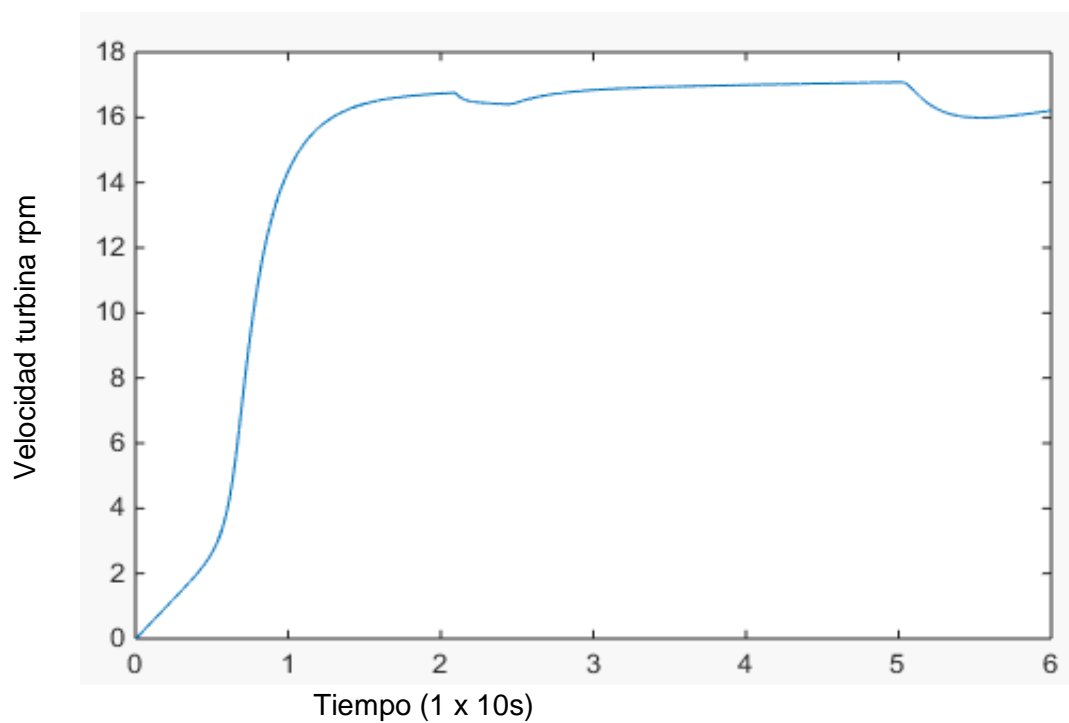


Figura 4-9. velocidad de la turbina obtenida.

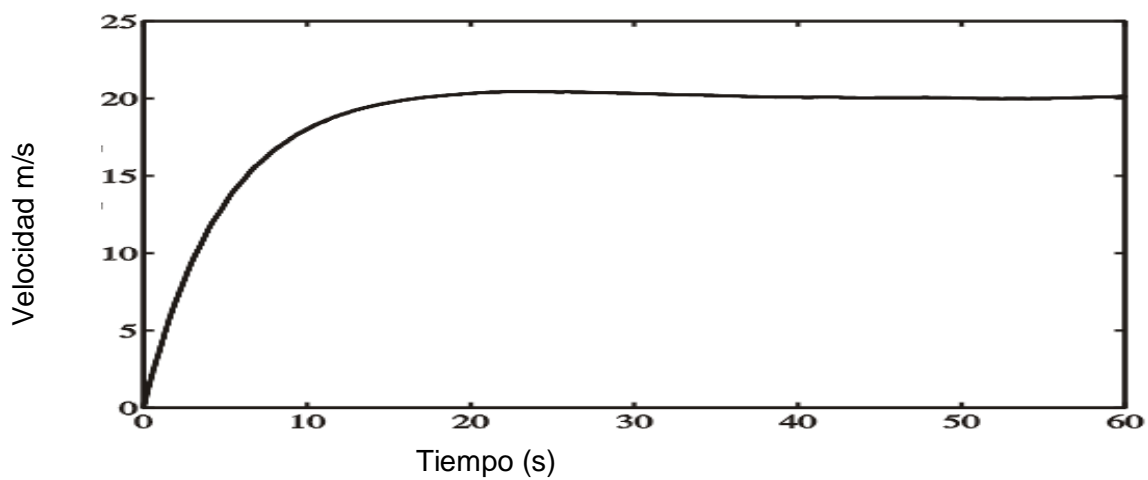


Figura 4-10. Velocidad de la turbina obtenida en [1].

5. Conclusiones.

El rápido crecimiento de la población mundial hace vital el estudio de fuentes de energía alternativas y la energía eólica desde hace muchos años representa una opción relevante para suplir parte de esta necesidad, por ello es vital obtener modelos que permitan optimizar la transformación de la energía del viento, teniendo en cuenta sus variaciones y su consecuente variación en potencia, para ello en este trabajo se muestra un camino que se empieza a explorar en los controladores adaptativos, que tienen en consideración las fluctuaciones del viento y su aleatoriedad.

El control adaptativo que se mostró permite el acople con un motor de inducción, el cual modelado a través de campo orientado permite su uso desde la perspectiva de un variador de velocidad, que combinado con la tecnología de estado sólido, desacopla las variables del campo magnético del rotor para controlar directamente la potencia y velocidad angular desde únicas variables.

El modelo no lineal es linealizado por realimentación, subsecuentemente se plantea una ley adaptativa que censa las variaciones de la entrada, en este caso la velocidad del viento, con respecto a la salida en el eje del motor, y desde este parámetro ajusta el controlador para permitir al esquema de control estar constantemente siguiendo las variaciones en la entrada.

Se muestra que el control vectorial indirecto implementado junto con un control adaptativo para considerar las variaciones del viento es una opción ventajosa, ya que se trata de un esquema de fácil implementación con respecto a otros controles más robustos y que por ende representa un costo operacional más alto.

6. Bibliografía

- [1]** Alan Mullane, G. Lightbody and R.Yacamini, "Adaptive Control of Variable Speed Wind Turbines," *IEEE Transactions, Power Engineering* (2001)101-110.
- [2]** A.D. Wright and L.J. Fingersh, "Advanced Control Design for Wind Turbines. Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests," Tech. Rep. NREL/TP-500-42437, March 2008.
- [3]** Fernando D. Bianchi, Hern´an De Battista, Ricardo J. Mantz, "Robust Multivariable Gain-Scheduled Control of Wind Turbines for Variable Power Production," *International Journal of Systems Control*, vol.1- 2010: iss.3. pp. 103-112, 2010.
- [5]** Rajib Datta and V.T.Ranganathan, "A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System," 2003 *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18.
- [6]** T. Senjyu, S. Tamaki, N. Urasaki, K. Uezato, H. Higa, T. Funabashi, H. Fujita and H. Sekine, "Maximum Wind Power Capture by Sensorless Rotor Position and Wind Velocity Estimation from Flux Linkage and Sliding Observer", In *Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 8, no. 2, 2007.
- [7]** C. Silva, G. Asher and M. Summer, "A Hybrid Rotor Position Observer for Wide Speed Range Sensorless PM Motor Drives Including Zero Speed", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 440-449, April 2006.
- [8]** J.P. Lyons and V. Vlatkovic, "Power Electronics and Alternative Energy Generation", In *Proc. Power Electronics Specialist Conference, PESC 2004.*, pp. 16-21, 2004.

- [9] Cardenas-Dobson R., "Control of wind turbines using a switched reluctance generator", PhD dissertation, University of Nottingham, 1996.
- [10] J. Vergauwe, A. Martinez, A. Ribas, "Optimization of a wind turbine using permanent magnet synchronous generator (PMSG)", ICREPQ'06, 2006.
- [11] S. A. Larrinaga, "Predictive control of the 2L-VSI and 3L-NPC VSI based on direct power control for MV grid connected power applications" Ph.D. Thesis, Arrasate – Mondragon (Spain) 2007.
- [12] L. Dodson, K. Busawon and M. Jovanovic, "Estimation of the power coefficient in a wind conversion system". Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, Seville, Spain, pp. 3450-3455, December 12-15, 2005.
- [13] J. G. Sloopweg, H. Polinder and W. L. Kling, "Representing wind Turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 4, 2003.
- [14] E. Muljadi, K. Pierce and P. Migliore. "Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines". Proceedings of the American Control Conference, 1998. vol. 3, pp. 1710 – 1714, 24-26 June 1998.
- [15] S. R. Hadian-Amrei and H. Iranmanseh, "Novel direct power control for compensating voltage unbalance and load fluctuations in PWM rectifiers", ACSE Journal, vol. 6, no. 4, Dec., 2006; pp. 39-45.
- [16] Carvalho Rosas, Pedro André. *Dynamic Influences Of Wind Power On The Power System*. PhD Thesis. Technical University of Denmark and Risoe National Laboratory. March 2003. ISBN 87 – 91184 -16 -9.
- [17] P. Ledesma. *Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica*. Ph.D.Thesis. Universidad Carlos III de Madrid. 2001.
- [18] Moffat, R.; Paresh C. Sen; Younker R.; Mohamed Bayoumi, M: Digital phase -locked Loop for induction motor speed control. IEEE Trans. on Ind. Applicat., Vol. IA-15, No. 2, March/April 1979, PP. 176-182.

- [19]** Plunkett, A. B: A current- controlled PWM transistor inverter Drive. Reprinted from IEEE Ann. Meet. Conf. Rec., pp. 785-792, 1997
- [20]** Kawakami, N.; Hombu, M.; Ikimi, T.; Ueda, A.; Takahashi, J.; Kamiyama, K: Quick response and low-distortion current control for multiple inverter-fed induction motor drives. IEEE Trans. on power Electron., Vol. 9, No. 2, PP. 240-246, March 1994.